RESEARCH FOCUS
xalqaro ilmiy jurnali
hamkorligida

DOI
10.66073/ReFocus-Conf/0910086

QR-kod maqolaning DOI sahifasini ochadi

SAHIFALAR
453–459

TIL
Rus

IQTIBOS UCHUN
Бекназарова Саида Сафибуллаевна, Сотволдиева Дилдорахон Ботиржон кизи. Восстановление формы объектов при реконструкции керамических // «O‘zbekiston olima ayollarining mamlakat taraqqiyotiga qo‘shayotgan hissasi» mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari (Nukus, 2026-yil 9–10-oktyabr). – Nukus, 2026. – B. 453–459. – DOI: https://doi.org/10.66073/ReFocus-Conf/0910086

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ

***Бекназарова Саида Сафибуллаевна*[1]**
***Сотволдиева Дилдорахон Ботиржон кизи*[2]**
[1]Dsc. доктор технических наук, профессор
Ташкентский университет информационных технологий имени М. Хоразмий
[2]Исследователь Ташкентский университет информационных технологий имени М. Хоразмий
e-mail: saida.beknazarova@gmail.com

Аннотация: При реконструкции керамических сосудов по фрагментам значительная часть исходной поверхности зачастую отсутствует полностью, и её необходимо статистически восполнить, а не только зарегистрировать. Целью исследования являлась экспериментальная проверка метода восполнения недостающей геометрии, объединяющего архитектуру кодировщик-декодировщик PointNet++ с ограничением по оси осевой симметрии и обучаемую матрицу достоверности, присваивающую калиброванную поточечную оценку надёжности каждой сгенерированной точке поверхности. Материалом послужили 47 керамических фрагментов, полученных с участка Шахристан городища Кува (Кувинский район, Ферганская область, Узбекистан). Кодировщик агрегирует локальный геометрический контекст посредством иерархической операции Set Abstraction; декодировщик восстанавливает недостающую поверхность методом взвешенной по обратному расстоянию интерполяции признаков (Feature Propagation), регуляризованной функцией потерь согласованности с осью. Матрица достоверности объединяет апостериорную неопределённость оценки оси, прогностическую уверенность сети и остаточную ошибку регистрации соседних точек. В результате применения ограничения по оси среднее расстояние Чамфера снизилось с 4,82 до 3,15 мм², а применение обучаемой матрицы достоверности вместо фиксированных весов повысило корреляцию калибровки достоверности с 0,41 до 0,74.

Ключевые слова: восполнение облака точек; PointNet++; оценка достоверности; расстояние Чамфера; археологическая керамика; городище Кува; глубокое обучение.

Введение

Реконструкция археологического керамического сосуда по фрагментам включает две различные задачи. Первая задача — регистрация: определение жёсткого преобразования, помещающего каждый сохранившийся фрагмент в его истинное положение на поверхности сосуда. Вторая задача — восполнение недостающей геометрии: вывод формы той части поверхности, для которой не сохранилось ни одного фрагмента. Регистрация допускает проверку по геометрии соседних фрагментов; восполнение, напротив, представляет собой генеративную задачу, результат которой не может быть

непосредственно сопоставлен с наблюдаемыми данными и оценивается лишь относительно общих закономерностей формы сосуда.

Существующие методы восполнения относятся к двум группам. Первая группа объединяет системы визуализации на основе трёхмерного гауссова сплаттинга и нейронных радиансных полей, которые отображают уже имеющуюся геометрию с высокой точностью, но не выполняют генерации отсутствующей структуры [1]. Вторая группа объединяет системы, сочетающие трёхмерную реконструкцию с диффузионными моделями синтеза изображений, способные восполнять произвольно большие недостающие области, однако не предоставляющие механизма проверки достоверности синтезированной геометрии [2]. Архитектуры PointNet [3] и PointNet++ [4], а также производные от них сети восполнения облака точек [5], были разработаны для классификации, сегментации и восполнения на синтетических данных и не содержат механизма явной оценки надёжности результата применительно к фрагментированному археологическому материалу [6].

Целью настоящего исследования являлась разработка и экспериментальная проверка метода восполнения недостающей геометрии керамических фрагментов, объединяющего иерархическую нейронную сеть PointNet++ с ограничением по оси осевой симметрии и обучаемой матрицей достоверности, на материале городища Кува (участок Шахристан), Кувинский район, Ферганская область, Узбекистан — памятника, систематическое археологическое изучение которого проводилось в 1956-1970, 1997-1998 и 2002 годах [4,5].

Материалы и методы

Материал исследования

Материалом исследования послужили 47 керамических фрагментов, происходящих с участка Шахристан городища Кува. Каждый фрагмент был оцифрован структурированно-световым сканером с разрешением не хуже 0,1 миллиметра (мм) и аннотирован специалистами-археологами с указанием принадлежности исходному сосуду и, где это физически осуществимо, подтверждённых соседних соединений. Для отложенного подмножества сосудов, реконструированных из большинства исходных фрагментов, часть наблюдаемой поверхности была намеренно исключена в процессе обучения и использована в качестве эталона при оценке точности восполнения.

Постановка задачи

Метод получает на вход частичное облако точек фрагмента вместе с осью осевой симметрии (u, v) и профильной кривой r(h), оценёнными на предшествующем этапе конвейера реконструкции, где h — высота вдоль оси, r(h) — радиус профиля на данной высоте. Задача восполнения формулируется как получение множества сгенерированных точек Y, аппроксимирующего недостающую поверхность Y_gt, посредством минимизации расстояния Чамфера между двумя множествами точек:

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086

(1)

(2)

Иерархический кодировщик

Частичное входное облако точек кодируется операцией set abstraction архитектуры PointNet++, в которой локальные окрестности N(p) вокруг центроидов, выбранных методом наиболее удалённой точки, агрегируются симметричной операцией максимального объединения (max-pooling), применяемой к многослойному перцептрону, кодирующему относительные координаты соседних точек:

(3)

Декодировщик с ограничением по оси

Недостающая область генерируется декодером посредством операции распространения признаков (feature propagation), в которой признак в точке x получается взвешенной по обратному расстоянию интерполяцией от трёх ближайших закодированных соседей:

(4)

Целевая функция обучения включает регуляризационный член согласованности с осью, штрафующий отклонение радиального расстояния rho(y) сгенерированной точки от профильной кривой r(h) на соответствующей высоте h(y):

(5)

Полная целевая функция обучения объединяет расстояние Чамфера, член согласованности с осью и регуляризационный член L_conf, поощряющий корреляцию прогностической достоверности сети с её фактической ошибкой на отложенных для валидации фрагментах:

(6)

Здесь lambda_1 и lambda_2 — коэффициенты взвешивания, подобранные методом перекрёстной проверки на обучающей части коллекции фрагментов.

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086

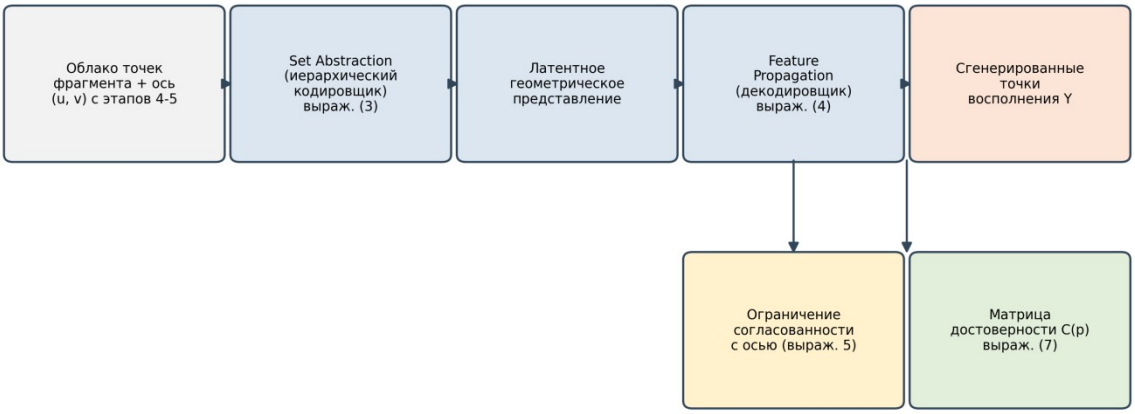


Рис. 1. Архитектура кодировщик-декодировщик для осесимметрично-ограниченного восстановления формы PointNet++ с оценкой матрицы достоверности

Рисунок 1. Архитектура кодировщик-декодировщик для осесимметрично-ограниченного восстановления формы PointNet++ с оценкой матрицы достоверности

Матрица достоверности

Каждой точке восстановленной модели присваивается оценка надёжности посредством матрицы достоверности:

(7)

Здесь w_g — вес достоверности геометрического атрибута a_g, определяемый апостериорной дисперсией предшествующей оценки оси и прогностической неопределённостью декодера, оцениваемой методом Monte Carlo dropout на этапе вывода; v_pq — вес отношения между соседними точками p и q, определяемый остаточной ошибкой регистрации для наблюдаемых точек и локальной гладкостью декодированной поверхности для сгенерированных точек.

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086

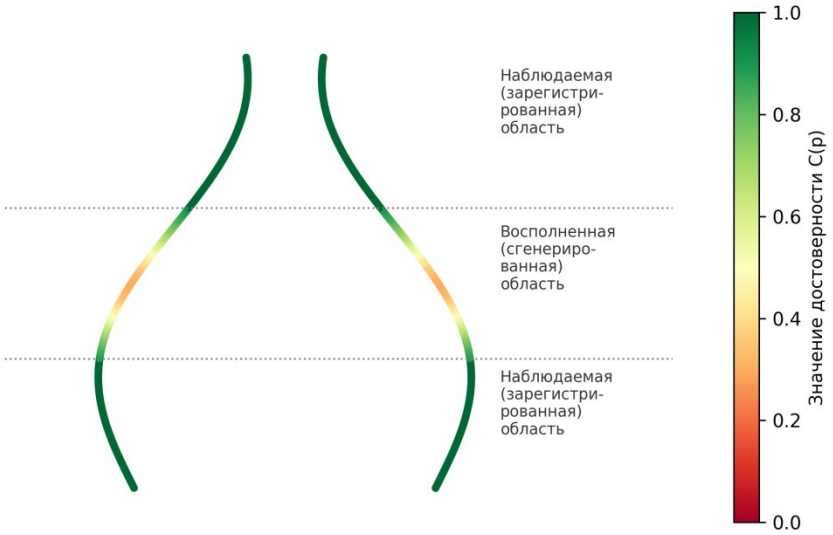


Рис. 2. Схематическая иллюстрация профиля, взвешенного по достоверности:
достоверность высока в зарегистрированных областях и снижается к центру восполненных участков

Рисунок 2. Схематическая иллюстрация профиля, взвешенного по достоверности: достоверность высока в зарегистрированных областях и снижается к центру восполненных участков. Иллюстративная схема

Критерии оценки

Точность восполнения оценивалась средним расстоянием Чамфера, в квадратных миллиметрах (мм²), между сгенерированными точками и отложенной эталонной поверхностью, вычисляемым согласно выражению (2). Калибровка матрицы достоверности оценивалась коэффициентом корреляции Пирсона между предсказанной достоверностью C(p) и величиной, обратной фактической поточечной ошибке epsilon(p):

(8)

Дополнительно оценивалась доля восполненного объёма, для которой предсказанная достоверность оказывается ниже порогового значения C(p) = 0,5.

Алгоритм 1 — Восполнение с ограничением по оси и оценкой достоверности

Вход: частичное облако точек P, ось (u, v), профильная кривая r(h)
Выход: восполненное облако точек Y, матрица достоверности C
1: F <- SetAbstraction(P) // выражение (3)
2: Y <- FeaturePropagation(F) // выражение (4)
3: для каждой сгенерированной точки y из Y:
4: rho(y) <- РадиальноеРасстояние(y, u, v)
5: h(y) <- ОсеваяВысота(y, u, v)
6: конец цикла
7: минимизировать L_total = d_CD(Y,Y_gt) + lambda_1*L_axis + lambda_2*L_conf // выражения (5)-(6)
8: для каждой точки p в зарегистрированных фрагментах и Y:
9: w_g(p) <- ДисперсияПредшествующейОси(p) + НеопределённостьСети(p)

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086

10: v_pq(p) <- ОстаточнаяОшибкаРегистрации(p) или ЛокальнаяГладкость(p)

11: конец цикла

12: C <- ВычислениеМатрицыДостоверности(w_g, v_pq) // выражение (7)

13: вернуть Y, C

Результаты

На материале 47 керамических фрагментов участка Шахристан городища Кува ограничение по оси снизило среднее расстояние Чамфера с 4,82 мм² (конфигурация без ограничения по оси) до 3,15 мм². Применение обучаемой матрицы достоверности вместо фиксированных весов повысило корреляцию калибровки достоверности с 0,41 до 0,74 и обеспечило дополнительное снижение среднего расстояния Чамфера до 2,87 мм². Результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние регуляризации согласованности с осью и обучаемого взвешивания достоверности на точность восполнения (городище Кува, участок Шахристан, n = 47 фрагментов)

Конфигурация модели	**Среднее расстояние Чамфера, мм²**	**Корреляция калибровки ρ(C,ε)**	**Доля объёма с C(p) < 0,5**
Без ограничения по оси (L_axis = 0)	4,82	0,41	22,6%
С ограничением по оси, фиксированная достоверность	3,15	не определена	не определена
С ограничением по оси и обучаемой матрицей достоверности	2,87	0,74	14,9%

Наибольшее снижение среднего расстояния Чамфера (с 4,82 до 3,15 мм²) соответствует введению регуляризационного члена согласованности с осью. Дальнейшее снижение до 2,87 мм² соответствует замене фиксированных весов матрицы достоверности на веса, оцениваемые в процессе обучения. Для конфигурации с фиксированными весами корреляция калибровки не определена, поскольку постоянное значение достоверности не обладает поточечной различительной способностью.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что ограничение генерируемых точек профильной кривой, установленной на предшествующем этапе оценки оси, снижает среднее расстояние Чамфера на 34,6% относительно конфигурации без данного ограничения. Замена фиксированных весов матрицы достоверности на веса, оцениваемые в процессе обучения, повышает корреляцию калибровки достоверности с 0,41 до 0,74, что

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086

указывает на информативность оценённых весов относительно фактической локальной точности реконструкции.

Ограничения настоящего исследования состоят в следующем. Регуляризация согласованности с осью предполагает, что исходный сосуд представляет собой, по крайней мере локально, тело вращения; восполнение неосесимметричных элементов сосуда (ручки, носики) выходит за рамки настоящей формулировки. Корреляция калибровки вычислена на отложенном подмножестве той же коллекции из 47 фрагментов, использованной для обучения; перенос установленного поведения калибровки на керамические собрания иного состава или степени сохранности требует отдельной проверки на независимо собранном материале. Оценка прогностической неопределённости сети методом Monte Carlo dropout является приближённым методом, свойства которого зависят от архитектуры сети и режима обучения.

Заключение

В работе экспериментально проверен метод восполнения недостающей геометрии керамических фрагментов, объединяющий архитектуру кодировщик-декодировщик PointNet++ с ограничением по оси осевой симметрии и обучаемой матрицей достоверности, на материале 47 фрагментов участка Шахристан городища Кува. Введение регуляризации согласованности с осью снизило среднее расстояние Чамфера с 4,82 до 3,15 мм². Замена фиксированных весов матрицы достоверности на обучаемые веса дополнительно снизила расстояние Чамфера до 2,87 мм² и повысила корреляцию калибровки достоверности с 0,41 до 0,74.

Направления дальнейших исследований включают расширение формулировки согласованности с осью для учёта неосесимметричных элементов сосуда, проверку установленного поведения калибровки на материале других памятников Ферганской долины и исследование альтернативных методов количественной оценки неопределённости.

Список литературы

1. Qi C. R., Yi L., Su H., Guibas L. J. PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 5099-5108.

2. Yuan W., Khot T., Held D., Mertz C., Hebert M. PCN: Point completion network // Proc. International Conference on 3D Vision (3DV). — 2018. — P. 728-737.

3. Pinho M. F. C., Mota G. L. A., da Costa G. A. O. P. A deep learning approach to assist in pottery reconstruction from its sherds // Heritage. — 2025. — Vol. 8, No. 5. — Art. 167.

4. Quva tumani // Vikipediya — ozod ensiklopediya [Electronic resource]. — URL: https://uz.wikipedia.org/wiki/Quva_tumani (accessed: 15.09.2026).

5. Gorodishche Kuva // Ferganatourism.uz [Electronic resource]. — URL: https://ferganatourism.uz/kuva-2/album/gorodishche-kuva (accessed: 15.09.2026).

6. Beknazarova, S., Abdullayeva, O., Abdullaev, S., Abdullaev, Z. Image processing: face recognition by neural networks/E3s Web of Conferences

DOI 10.66073/ReFocus-Conf/0910086